反砂堆形成に関する3次元数値シミュレーション

○京都大学大学院　学生員　稲葉　良也
京都大学大学院　正会員　音田　慎一郎
京都大学大学院　フェロー　細田　尚

１．はじめに

急流河川において洪水時に反砂堆が生じると，その上部の水面が盛り上がることで巨大な水面波が発生する．このような水面波は，堤防の越流や橋桁への衝突の危険性を増大させる可能性があるため，反砂堆の形成過程とそれに伴う水面変動を予測することは河川管理上重要である．本研究では3次元流体解析モデルと土砂輸送モデルを組み合わせ，反砂堆の形成過程に関する数値解析を行い，既往の実験結果[1)]と比較することで数値モデルの妥当性を検証することを目的としている．

２．数値解析モデル

(1) 流体解析モデル

流れのモデルには，密度関数法とPorous Media法を用いた3次元流体解析モデルを適用する[2)]．このモデルでは表面流と浸透流を同時に予測することができる．基礎式は以下のとおりである．

$$\frac{\partial(1-c)\Phi}{\partial t}+\frac{\partial(1-c)u_j\Phi}{\partial x_j}=0 \tag{1}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial t}\{(1-c)u_i\}+\frac{\partial}{\partial x_j}\{(1-c)u_iu_j\}&=(1-c)g_i-\frac{(1-c)}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_i}\\&+\frac{\partial}{\partial x_j}\left\{-(1-c)\overline{u_i'u_j'}\right\}+\nu\frac{\partial}{\partial x_j}\left\{(1-c)\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right\}-\frac{\nu(1-c)^2u_i}{K_d}\end{aligned} \tag{2}$$

$$\rho=\Phi\rho_{liq}+(1-\Phi)\rho_{gas} \tag{3a}$$

$$\mu=\Phi\mu_{liq}+(1-\Phi)\mu_{gas} \tag{3b}$$

ここに，t：時間，x_i：デカルト座標系，u_i：流速ベクトルの方向成分，Φ：密度関数，c：固相の体積濃度，u_i'：乱れ速度ベクトル，p：圧力，ρ：流体の密度，ρ_{liq}：液相の密度，ρ_{gas}：気相の密度，ν：動粘性係数，μ：流体の粘性係数，μ_{liq}：液相の粘性係数，μ_{gas}：気相の粘性係数，g_i：重力加速度ベクトル，K_d：固有透水係数である．乱流モデルには非線形k-εモデルを用いる．

(2) 土砂輸送モデル

土砂輸送形態として掃流砂のみを扱う．主流方向の流砂量q_{bs}にはKovacs and Parker式[3)]，横断方向の流砂量q_{bn}には長谷川の式[4)]を用いる．

$$\begin{aligned}q_{bs}&=\frac{u_p/u_*}{\mu_n\left(1+\dfrac{\partial z_b}{\partial s}\Big/\mu_n\right)}\left[\tau_*-\tau_{*c}\left(1+\frac{\partial z_b}{\partial s}\Big/\mu_n\right)\right]\\&\times\left[\tau_*^{1/2}-\tau_{*c}^{1/2}\left(1+\frac{\partial z_b}{\partial s}\Big/\mu_n\right)^{1/2}\right]\sqrt{\left(\frac{\sigma}{\rho}-1\right)gd^3}\end{aligned} \tag{4}$$

$$q_{bn}=q_{bs}\left(-\sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\mu_s\mu_n\tau_*}}\frac{\partial z_b}{\partial n}\right) \tag{5}$$

ここに，τ_*：無次元掃流力，τ_{*c}：無次元限界掃流力，μ_n：河床材料の動摩擦係数，μ_s：河床材料の静止摩擦係数，u_*：摩擦速度，z_b：河床高，σ/ρ：砂粒子の水中比重，d：河床材料の粒径，u_p：河床近傍の格子点における主流速，κ：カルマン定数である．

以上より求めた(q_{bs}, q_{bn})を直交座標系に変換し，流砂の連続式から河床変動の計算を行う．

$$\frac{\partial z_b}{\partial t}+\frac{1}{1-\lambda}\left\{\frac{\partial q_{bx}}{\partial x}+\frac{\partial q_{by}}{\partial y}\right\}=0 \tag{5}$$

ここに，λ：河床材料の空隙率である．

(3) 数値解析法

本解析の計算手法について説明する．基礎式の離散化には有限体積法を適用し，完全スタガード格子を用いる．運動方程式の移流項の離散化にはQUICKスキームを，Φの移流方程式の離散化にはTVD-MUSCL法を用いた．また，速度場の数値拡散による気液界面のぼやけを防ぐため，Φについては体積補正を行った．k及びε方程式の移流項の離散化にはHybrid法を適用する．固定壁面及び河床近傍の境界条件には壁関数法を用い，せん断応力と乱流特性量を求めた．

３．反砂堆形成実験への適用

3次元流体解析モデルと土砂輸送モデルを組み合わせた数値モデルを井上ら[1)]が行った反砂堆形成実験のRun7に適用する．実験では長さ25m，幅0.5mの水路を用い，平均粒径5mmのほぼ一様砂を使用している．

キーワード　反砂堆，3次元数値解析，密度関数法
連絡先　〒615-8540　京都府京都市西京区京都大学桂C1-3　TEL075-383-3269

© Japan Society of Civil Engineers

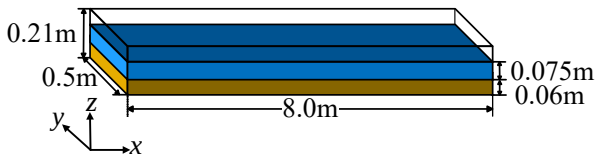

図-1　計算領域の概念図

水路勾配は 0.018，流量は 0.0429m^3/sec である．実験では水面波と河床波は同位相のまま下流に移動していた．

本解析における計算領域の概念図を**図-1** に示す．境界条件として上流端に定常流量を与え，下流端は自由流出とする．また，上下流端から一定区間は計算の安定化のため固定床を設置し，t = 100sec まで計算を行った．

河床高コンターの時間変化を**図-2** に示す．3 次元的な反砂堆の形成が確認できる．また，水面波の形状特性について実験結果と比較すると，計算結果の平均波長は 0.613m であり，実験値の 0.550m と概ね一致する結果が得られた．一方，計算結果の平均波高は 0.0115m であり，実験値の 0.0750m を大幅に下回る結果となった．**図-3** に本解析における t = 35sec，40sec，45sec での水路中央断面の流況図を示す．赤色の領域が水域を示しており，表面流では 1.5m/sec 程度の流速が生じている．矢印の部分に着目すると，河床波と水面波が同位相のまま下流方向へ移動していくことが確認できる．しかし，河床波・水面波の移動速度は時間経過に伴い鈍る傾向があり t = 100sec 付近ではほとんど移動しなくなった．この点については今後の課題としたい．

4．まとめ

本研究では 3 次元流体解析モデルと土砂輸送モデルを組み合わせ，反砂堆形成過程に関する数値解析を行った．水面波の平均波長，河床波の移動方向については実験結果と概ね一致する結果が得られた．しかし，水面波の波高が過小評価されること，河床波の波高増大に伴って，河床波・水面波が移動しなくなることなど課題も見られた．

参考文献

1) 井上卓也，長谷川和義，渡部靖憲，船木淳悟：三次元的な反砂堆上の水面波に関する実験的研究，土木学会論文集 A2(応用力学), pp739-746, 2015.

2) Onda, S., Hosoda, T., Jacimovic, N. and Kimura, I.: Numerical modelling of simultaneous overtopping and seepage flows with application to dike breaching, Journal of Hydraulic Research, Vol.57, No.1, pp.13-25, 2019.

3) Kovacs, A. and Parker, G.: A new vectorial bedload formulation and its application to the time evolution of straight river channels, Journal of Fluid Mechanics, Vol.267, pp.153-183, 1994.

4) 長谷川和義：沖積蛇行の平面および河床形状と流れに関する水理学的研究，北海道大学博士論文, 1984.

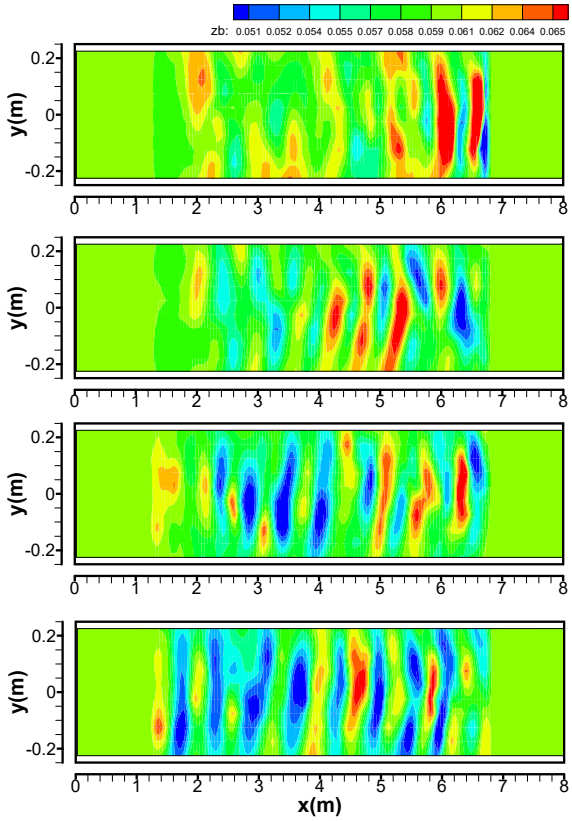

図-2　河床高コンターの時間変化

（上から順に t = 25sec，50sec，75sec，100sec）

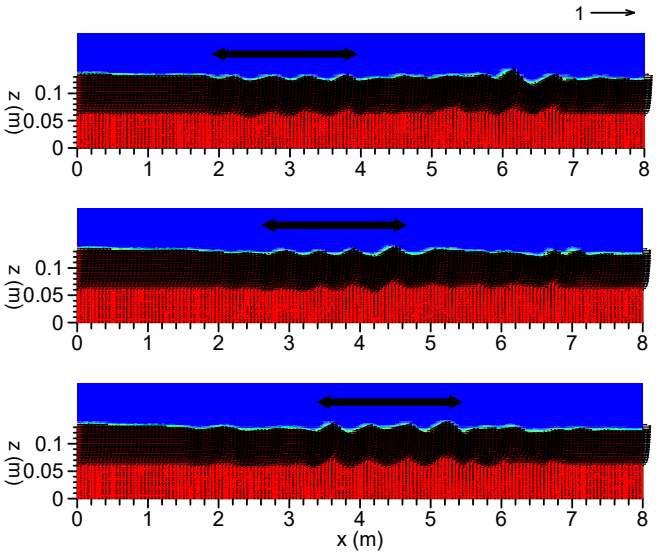

図-3　水路中央断面での流況図

（上から順に t = 35sec，40sec，45sec）

© Japan Society of Civil Engineers